

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství
Ústav konstruování

Akademický rok: 2007/08

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Stein Pavel

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Věž větrné elektrárny - výpočet

v anglickém jazyce:

Wind power station tower - calculation

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem bakalářské práce je podat přehled současného stavu poznání v oblasti konstrukce extrémně vysokých věží větrných elektráren, doplněný vymezením trendů budoucího vývoje.

Cíle bakalářské práce:

Bakalářská práce musí obsahovat:

1. Definici základních pojmů.
2. Přehled a rozbor existující literatury v dané oblasti.
3. Analýzu a zhodnocení získaných poznatků.
4. Vymezení trendů budoucího vývoje.
5. Souhrnnou bibliografii.

Forma bakalářské práce: průvodní zpráva.

Seznam odborné literatury:

Puchmajer P.: Pružnost a pevnost, 2005.

Apetaur M.: Mechanika poddajných těles: pružnost a pevnost. 2004.

Vedoucí bakalářské práce: doc. RNDr. Ing. Josef Nevrlý, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2007/08.

V Brně, dne 22.11.2007

L.S.



prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je podat přehled současného stavu konstrukce věže větrné elektrárny. V první části popisuje význam a vývoj alternativních zdrojů energie, zejména větrné energetiky na českém území. V dalším se zaměřuje na některé konstrukční varianty větrných elektráren a jejich základní prvky. Závěr práce je orientován na moderní varianty v problematice větrných elektráren a naznačuje možnosti budoucího vývoje.

KLÍČOVÁ SLOVA

věž, energie, alternativní, vítr, generátor, rotor, převodovka, list

ABSTRACT

The target of this labour is to give summary of contemporary level of construction of wind power station tower. The first part describes importance and progress of alternative sources of energy, especially wind energetic in Czech republic. Next point concerns some construct options of wind power station tower and its basic elements. Close of the work is oriented to modern forms in problems of the wind power station tower and indicates options of modern development.

KEYWORDS

tower, energy, alternative, wind, generátor, rotary, gearbox, blade

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

STEIN, P. *Věž větrné elektrárny - výpočet*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 50 s. Vedoucí bakalářské práce prof. RNDr. Ing. Josef Nevrlý, CSc.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci *Věž větrné elektrárny* vypracoval samostatně pod vedením prof. RNDr. Ing. Josefa Nevrlého, CSc. a uvedl v seznamu literatury všechny použité literární a odborné zdroje.

V Brně dne 18. května 2008

vlastnoruční podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval prof. RNDr. Ing. Josefu Nevrlému, CSc. za cenné připomínky a rady, kterými přispěl k vypracování této bakalářské práce.

OBSAH**OBSAH**

ÚVOD	13
1 PRINCIP VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY	14
1.1 Vítr	14
1.2 Princip	14
1.3 Potenciál větrné energie v České republice	15
1.3.1 Definice potenciálu	15
1.4 Větrná mapa	15
1.5 Rychlost větru	16
1.6 Energie a výkon větru	17
2 VĚTRNÉ MOTORY	20
2.1 Rozdělení větrných elektráren	20
2.2 Prvky umožňující urychlení proudu vzduchu	22
2.3 Funkce a výpočet výkonu větrného motoru	23
2.4 Lopatky rotoru	24
2.5 Regulace větrných motorů	26
3 PRVKY VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY	28
3.1 Základní prvky elektrárny	28
3.2 Konstrukce věže	29
3.2.1 Základy věží	29
3.2.2 Pobřežní věže	31
3.2.3 Svařování ocelových věží pobřežních větrných elektráren pod tavidlem	31
3.3 Konstrukce a základní schéma tělesa gondoly	33
3.4 Konstrukce rotoru	35
3.4.1 Rotorové listy	35
3.4.2 Náboj	37
3.5 Hnací ústrojí	37
3.5.1 Převodovka s proměnným převodovým poměrem	38
3.5.2 Přímý pohon	39
3.5.3 Systém natáčení věže	40
3.5.4 Ložiska pro nastavení listů rotoru a otáčení celé gondoly	41
4 BUDOUCÍ VÝVOJ VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN	43
4.1 Plovoucí větrné elektrárny	43
5 ZÁVĚR	44
6 POUŽITÉ ZDROJE	45
7 POUŽITÉ ZKRATKY, SYMBOLY A VELIČINY	47
8 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	48
9 SEZNAM TABULEK	50

ÚVOD

ÚVOD

Větrná energetika se řadí mezi alternativní způsoby získávání především elektrické energie. Na území České republiky má větrná energie poměrně dlouhou tradici, kdy byla využívána ve větrných mlýnech. Historicky je existence prvního větrného mlýna na území Čech, Moravy a Slezska doložena již v roce 1277 v zahradě Strahovského kláštera v Praze. [4]



Obr. 1 Větrný mlýn v Rymicích
na kroměřížsku z roku 1795 [10]

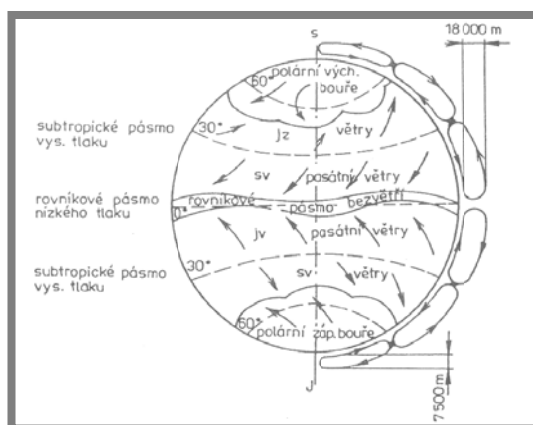
Například jaderná energetika je tedy ve srovnání s větrnou skutečnou novinkou. Rozkvět větrných elektráren na území České republiky vyvrcholil v letech 1990-1995, poté následovala léta stagnace větrné energetiky. V současné době se větrné elektrárny nacházejí na více než padesáti lokalitách v ČR, jejich nominální výkon se pohybuje od 0,004 až po 2 MW. Mezi výrobce se řadí několik českých firem, ale u větších výkonů jsou to především dodavatelé z Německa a Dánska. Například v roce 2006 vyrobily větrné elektrárny na území ČR téměř 50 GWh elektrické energie, nejvíce na severozápadě ČR a na střední Moravě. Na celkové výrobě elektřiny v ČR se větrné elektrárny podílely pouze 0,4 %, což je přibližně třetina průměrného podílu v zemích EU. [4]

Využívání alternativních zdrojů energie se řadí mezi klíčové body energetické politiky Evropské unie, neboť se jedná o poměrně levné a hlavně ekologicky čisté zdroje. Z tohoto důvodu se většina států snaží o co nejvyšší podíl takto ekologicky vyrobené energie. Současný plán České republiky slibuje do roku 2010 celých 8 % z celkové výroby elektřiny. [4]

1 PRINCIP VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY

1.1 Vítr

Vítr je proudění vzduchu způsobené rozdíly atmosférického tlaku. Ty způsobují změny teplot, při kterých se mění hustota vzduchu. Vzduch proudí z míst o vyšších tlacích do míst o tlacích nižších. Rychlost větru závisí na velikosti tlakového rozdílu. Základní vlastnosti proudění vzduchu v zemské atmosféře popisují následující obrázky.



Obr. 1.1 Schéma hlavních směrů větru na zeměkouli [2]



Obr. 1.2 Schéma proudění vzduchu mezi tlakovou výší (V) a níží (N) na severní polokouli [2]

1.2 Princip

Působením aerodynamických sil na listy rotoru převádí větrná turbína umístěná na věži energii větru na rotační pohyb, tím se získává energie mechanická. Ta je poté prostřednictvím generátoru zdrojem elektrické energie (na podobném principu turbogenerátoru pracuje jak klasická, tak i vodní či jaderná elektrárna). Podél rotorových listů vznikají aerodynamické síly, listy proto musejí mít speciálně tvarovaný profil, který se velmi podobá profilu křídel letadla. Se vzrůstající rychlostí vzdušného proudu rostou vztahové síly s druhou mocninou rychlosti větru a energie vyprodukovaná generátorem s třetí mocninou. Je proto třeba zajistit efektivní a

rychle pracující regulaci výkonu rotoru tak, aby se zabránilo mechanickému a elektrickému přetížení větrné elektrárny.

Obsluha větrné elektrárny je automatická, řízená moderní výpočetní technikou. Životnost nové větrné elektrárny se udává 20 let od uvedení do provozu. [2]

1.3 Potenciál větrné energie v České republice

1.3

Znalost potenciálu větrné energie je důležitým podkladem pro tvorbu plánování v oblasti nejen větrné energetiky. Takovým oborem je například systém vyrovnávání odchylek mezi výrobou a spotřebou energie.

V minulosti vycházely hodnoty potenciálu větrné energie v České republice pouze z hrubých odhadů, bez důkladnějších analýz klimatických a geografických podmínek. Využívaly již neaktuálních parametrů (menší výška a výkon větrných elektráren, vyšší cena na jednotku výroby energie). Proto byla vytvořena nová studie potenciálu větrné energie, která využívá modernějších a přesnějších postupů a vychází z aktuální situace technologie větrných elektráren. [16]

1.3.1 Definice potenciálu

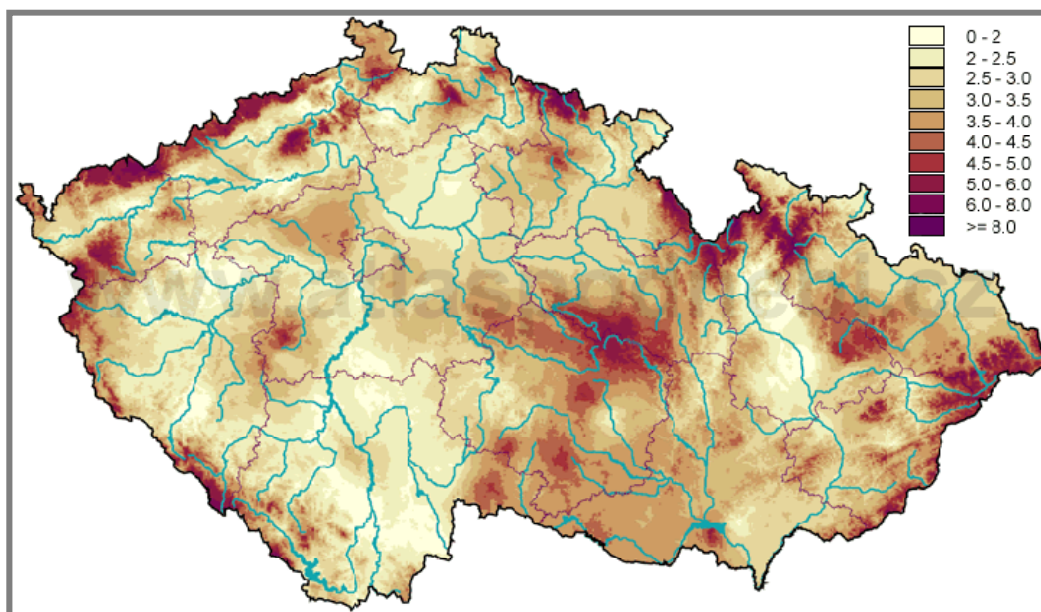
1.3.1

Potenciál větrné energie je vždy nutno rozlišovat. V teoretické rovině je možné definovat tzv. **klimatologický potenciál**. Ten udává celkové množství energie, které je z větru možno získat za určitých předem definovaných podmínek. Je zřejmé, že se jedná o vysokou hodnotu, která je ovšem pouze teoretickou hodnotou, ve které nejsou zahrnuty žádné reálné vlivy. Tyto jsou zahrnuty v tzv. **technickém potenciálu**, ten ukazuje, jaký by byl maximální možný rozvoj větrné energetiky při využití všech jejích moderních technických možností. Snahou je tedy najít tzv. **realizovatelný potenciál**, tedy takový potenciál, jehož realizace je za současných podmínek opravdu možná. Lze říct, že zatímco klimatologický potenciál lze poměrně objektivním přístupem vypočítat, tak technický potenciál již závisí na předem zvolených předpokladech a metodách. Odhad realizovatelného potenciálu je pak zcela zásadním způsobem ovlivněn subjektivním přístupem pracovníka, jeho zkušenostmi a postoji. [16]

1.4 Větrná mapa (Obr. 1.3)

1.4

Jako první krok pro zjištění potenciálu je zjištění reálných větrných podmínek. Za tímto účelem jsou vytvářeny tzv. větrné mapy. V historii již bylo vytvořeno několik generací těchto map. Mapy se aktualizovaly zejména vzhledem k výšce větrných elektráren.



Obr. 1.3 Větrná mapa České republiky [3]

1.5 Rychlost větru

Základním parametrem, který podstatně ovlivňuje rychlost proudění vzduchu, je zemský povrch. V oblastech s rovinným profilem terénu ovlivňuje rychlost větru pouze drsnost povrchu. Pro výpočet rychlosti větru lze použít následujícího vztahu:

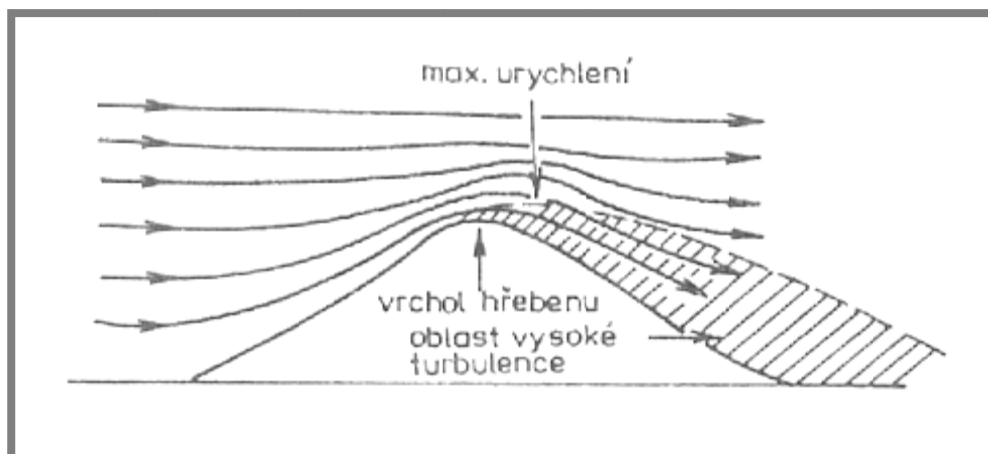
$$\frac{v^*}{v_0^*} = \left(\frac{h}{h_0}\right)^n [2] \quad (1.1)$$

kde v^* [m/s] je průměrná rychlost větru ve výšce h nad zemským povrchem;
 v_0^* [m/s] je průměrná rychlost větru v referenční výšce h_0 ;
 h [m] je výška, ve které je rychlost proudění vzduchu počítána;
 h_0 [m] je referenční výška, ve které je rychlost proudění vzduchu známá;
 n [-] je korekční exponent, který závisí na drsnosti a profilu povrchu (tab. 1.1).

Tab. 1.1 Závislost exponentu n na druhu povrchu [2]

Druh povrchu	n
hladký povrch – vodní hladina, písek	0,14
louka s nízkým travnatým porostem nebo oranice	0,16
vysoká tráva, nízké obilné porosty	0,18
porosty vysokých kulturních plodin, nízké lesní porosty	0,21
lesy s mnoha stromy	0,28
vesnice a malá města	0,48

Rychlost větru má zásadní vliv na produkovaný výkon větrných elektráren, proto se často staví na vhodných místech. Příkladem může být osamocený horský hřeben, který je orientovaný kolmo na proudění vzduchu. V tomto případě je vítr donucen obtékat vrchol, tím dochází k zhuštění proudnic vzduchu a vzduch je urychlován (Obr. 1.4).



Obr. 1.4 Urychlení větru na horském hřebenu [2]

1.6 Energie a výkon větru

1.6

Energie hmoty vzduchu v pohybu se snadno stanoví z jednoduché rovnice pro kinetickou energii:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \text{ [J] [2] (1.2),}$$

kde m [kg] je hmota a v [m/s] rychlost vzduchu. Hmota lze vyjádřit z hustoty ρ [kg/m³] a z objemu V [m³] pomocí vztahu:

$$m = \rho V = \rho As \text{ [kg] [2] (1.3);}$$

kde A [m²] je plocha, kterou prochází daný objem a s [m] je dráha, kterou urazí vzduch v pohybu.

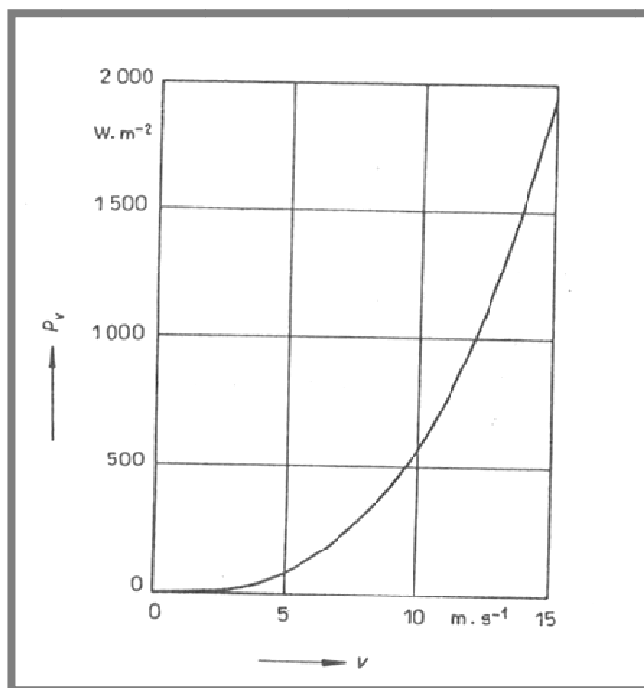
Výkon vrtule vztažený na jednotkovou plochu se stanoví:

$$P_v = \frac{E}{A \cdot t} = \frac{1}{2} \rho \frac{A \cdot s}{A \cdot t} v^2 \text{ [W/m}^2\text{] [2] (1.4),}$$

kde t [s] je čas. Dosazením výrazu $s/t = v$ získáme výraz:

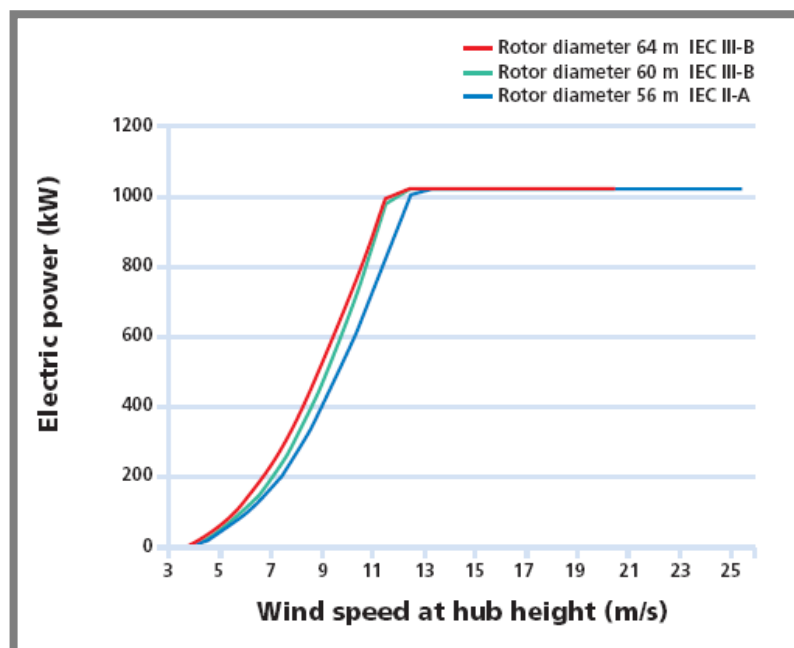
$$P_v = \frac{1}{2} \rho v^3 \text{ [W/m}^2\text{] [2] (1.5).}$$

Z uvedené ho vztahu vyplývá, že výkon jednotkovou plochou je přímo úměrný třetí mocnině rychlosti větru.



Obr. 1.5 Závislost výkonu větru P_v protékajícího jednotkovou plochou 1 m^2 na jeho rychlosti v [2]

Výše uvedená závislost byla zjištěna pro $\rho = 1,15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Pro tuto hodnotu je výkon vztažený na jednotkovou plochu roven 1 Wattů, při rychlosti $v = 1,21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 1 kW při rychlosti $v = 12,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Z grafu dále vyplývá, že efektivního využívání větru se dosahuje při vyšších rychlostech větru. Tento závěr potvrzuje výkonová křivka větrné elektrárny od finského výrobce WinWindD (Obr. 1.6). [2]



Obr. 1.6 Výkonové křivky větrné elektrárny WWD-1[11]

Energie větru za daný časový úsek jednotkovou plochou při konstantní teplotě a hustotě vzduchu je dána vztahem:

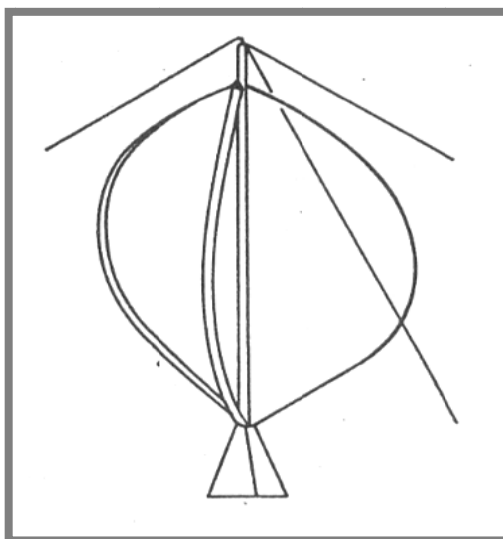
$$E_v = \frac{\rho}{2} \int_{t_0}^t v^3 dt \text{ [J/m}^2\text{] [2] (1.6).}$$

2 VĚTRNÉ MOTORY

2.1 Rozdělení větrných elektráren

Základní hlediska rozdělení větrných elektráren:

- podle aerodynamického principu na:
 - a) **vztlačové** – vítr obtéká lopatku, ta má tvar podobný letecké vrtuli, vzniká vztlačová síla, která roztáčí rotor elektrárny
 - b) **odporové** – rotor uvádí do rotačního pohybu vítr, který se opírá do lopatky a ta mu klade odpor
- podle typu rotoru elektrárny na:
 - a) se svislou osou rotace
 - **Darrielův** rotor (Obr. 2.1) – účinnost tohoto typu rotoru dosahuje 38 % a využívá se pro výrobu stejnosměrného i střídavého proudu. Obvykle se skládá ze dvou či více rotorových listů, umístěných na společné svislé ose rotace. Za rotace mohou listy vytvářet válcovou, kuželovou, kulovou nebo parabolickou plochu. [3]



Obr. 2.1 Rotor typu Darrieus se zakřivenými lopatkami do tvaru Φ [2]

- **Savoniův** rotor - účinnost tohoto typu rotoru dosahuje 30 % a využívá se pro výrobu stejnosměrného i střídavého proudu. Rotor tvoří dvě přesazené válcové plochy, které využívají tzv. Robinsonova jevu. Ten spočívá v tom, že odpor vyduuté části je asi 4x větší než odpor části vypuklé, tím dochází k rotaci. Mezi hlavní výhody tohoto rotoru je cena a poměrně snadná konstrukce. [3]

V praxi se často objevuje kombinace obou uvedených rotorů dohromady (Obr. 2.2), kdy Savoniův rotor zajišťuje hladký rozběh a Darrielův rotor vyšší účinnost. [3]

Mezi výhody těchto typů rotorů patří to, že není nutné jejich natáčení do převládajícího směru větru.



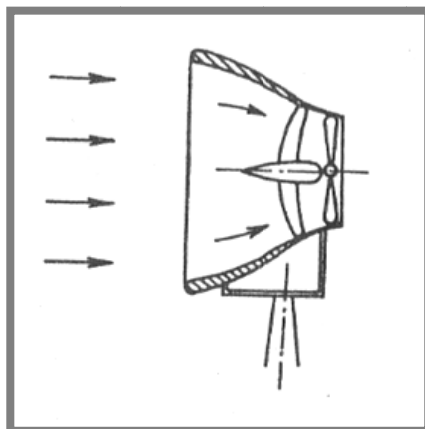
Obr. 2.2 Darrielův rotor v kombinaci se Savoniovým rotorem [3]

- b) s horizontální osou rotace
 - **větrné vrtule** – jedná se o zařízení s účinností, která se pohybuje okolo 45 %. Primárním úkolem těchto zařízení je výroba elektrické energie. V technické praxi se převážně využívá třílistých rotorů. Použití jedno, dvou popř. čtyřlistých vrtulí je omezeno pouze na ojedinělé případy spíše mimo průmyslovou praxi. [3]
 - **lopatková kola** - tento typ pomaloběžných zařízení nachází uplatnění především při čerpání vody z hlubokých studní. Počet lopatek se často pohybuje v rozmezí desíti až třiceti kusů. Účinnost tohoto typu rotoru se pohybuje v rozmezí 20-40 %. [3]
- podle připojení do elektrické sítě na:
 - a) **„grid on“ systémy** – jedná se o takové typy větrných zařízení, které jsou připojeny do elektrické sítě a energii do ní dodávají. Tato zařízení se využívají zejména ke komerčním účelům, proto se budují zejména na místech se silným, zejména stálým prouděním vzduchu.
 - b) **„grid off“ systémy** – typy větrných zařízení, která jsou nezávislá na elektrické síti, tudíž žádnou elektrickou energii do ní nedodávají. Místo toho bývají napojeny k akumulátoru stejnosměrného proudu. Jejich výkon se pohybuje od 0,1 – 5 kW. [3]

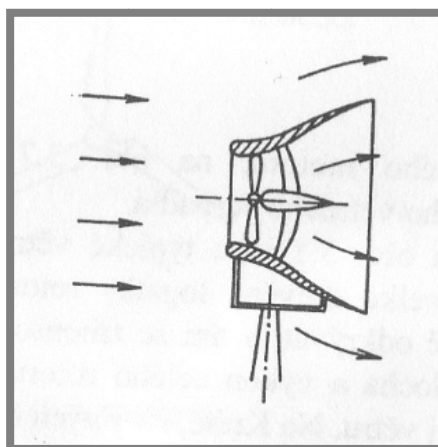
- Podle instalovaného výkonu na větrné elektrárny:
 - a) **mikro** – „grid off“ systémy do výkonů 1kW [5]
 - b) **malé** – tento druh je charakterizován výkony do 20 kW. Často se jedná o „grid off“ systémy v místech bez možnosti připojení k elektrické síti. [3]
 - c) **střední** – výkony od 20 do 50 kW [3]
 - d) **velké** – výkony nad 50 kW. Tyto elektrárny se řadí do systémů „grid on“. [3]

2.2 Prvky umožňující urychlení proudu vzduchu

Výkon větrné vrtule dokáže zvýšit kapotáž. Ta působí jako konfuzor před vrtulí, a tím urychluje proud vzduchu procházející rovinou vrtule (Obr. 2.3). Pokud je kapotáž orientována za rovinu vrtule, tak se jedná o difuzor. Princip difuzoru je takový, že snižuje odtokovou rychlost, tím dochází ke zvýšení tlakového spádu (Obr. 2.4). Je nutné podotknout, že daná uspořádání nemají praktický význam, protože hledisko ceny, hmotnosti a výrobních komplikací není vyšší než hledisko přínosu. [2]



Obr. 2.3 Urychlení proudu vzduchu pomocí konfuzoru[2]

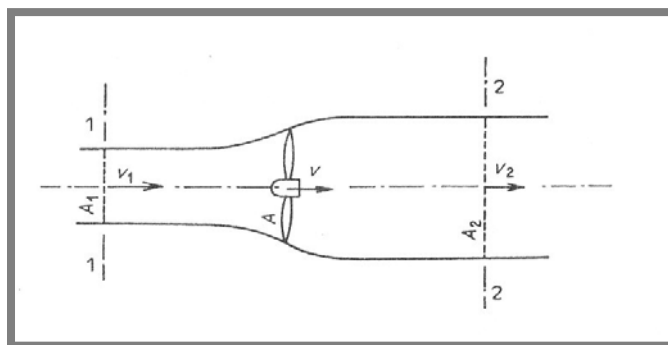


Obr. 2.4 Možnost zvýšení výkonu vrtule s použitím difuzoru[2]

2.3 Funkce a výpočet výkonu větrného motoru

Základním úkolem větrného motoru je přeměna kinetické energie větru na mechanickou práci. Toho se docíluje tím, že vrtule zpomaluje proud vzduchu a tím odebírání část jeho energie. Tento děj probíhá podle zákona o zachování energie, podle kterého nelze odejmout více energie, než vítr obsahuje. [2]

Na obrázku 2.5 je schématicky zobrazen proud vzduchu procházející větrným motorem. Proud je ohraničen dvěma kontrolními plochami 1 a 2, ve kterých proudí rychlostmi v_1 a v_2 , přes průřezy A_1 a A_2 . V rovině vrtule vzduch proudí přes plochu A rychlostí v . [2]



Obr. 2.5 Schéma proudu vzduchu procházejícího vrtulí [2]

V prostoru mezi plochami 1 a 2 platí rovnice kontinuity:

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 = v A \quad [2] \quad (2.1),$$

Platí vztah pro axiální sílu působící na rotor, který vychází ze zákona zachování hybnosti:

$$F_a = \rho A v (v_1 - v_2) \quad [\text{N}] \quad [2] \quad (2.2),$$

Dosazením vztahu $v = \frac{v_1 + v_2}{2}$ získáme:

$$F_a = \frac{1}{2} \rho A (v_1^2 - v_2^2) \quad [\text{N}] \quad [2] \quad (2.3).$$

Výkon pak bude pro zvolenou rychlost větru v_j a zvolený výkonový součinitel C_p :

$$P_j = \frac{\rho}{2} C_p A v_j^3 \quad [\text{W}] \quad [2] \quad (2.4),$$

kde $A = \pi R^2 \quad [\text{m}^2]$ je plocha rotoru.

Pro stanovení průměru rotoru platí vztah:

$$D = \sqrt{\frac{8 P_j}{C_p \pi \rho v_j^3}} \quad [\text{m}] \quad [2] \quad (2.5).$$

Dalším významným parametrem jsou jmenovité otáčky rotoru $n_j[\text{min}^{-1}]$, při jmenovitém výkonu:

$$n_j = \frac{60\lambda_0 v_j}{\pi D} [\text{min}^{-1}] \quad [2] \quad (2.6),$$

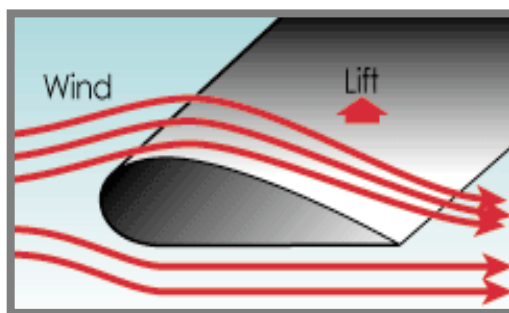
kde λ_0 je rychlostní poměr.

Tab. 2.1 Dosahované hodnoty výkonového součinitele C_p a rychloběžnosti u vybraných typů větrných motorů [2]

Typ	C_{popt}	λ_{opt}	λ_{max}
Lopátkový rotor	0,35	1,1	2,0
Třílistý rotor	0,18 – 0,39	2,5 – 6	
Dvoulistý rotor	0,20 – 0,48	6 – 10	
Rotor Savonius	0,23	0,85	1,8
Rotor Darrieus třílistý	0,362	4,66	6,76
Rotor Darrieus jednolistý	0,236	6,1	10,0
Miskový kříž	0,0195	0,14	0,31

2.4 Lopatky rotoru

Základním konstrukčním prvkem větrného motoru, který odebírá energii větru, jsou lopatky. Proto musejí mít specifický tvar, který se v řezu jeví jako tzv. vztlačový profil, nebo také aerodynamický profil (Obr. 2.6).



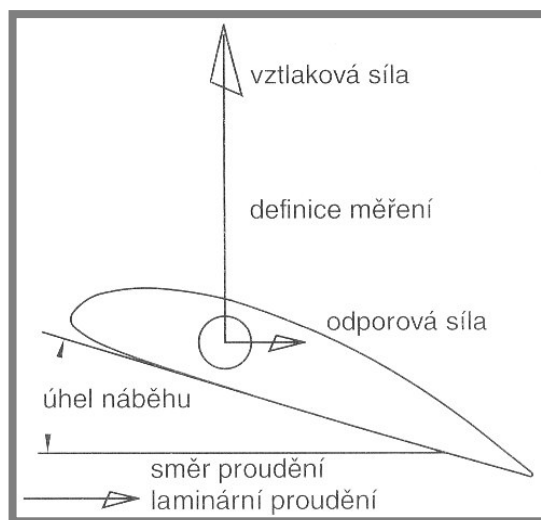
Obr. 2.6 Zobrazení aerodynamického profilu v proudu vzduchu [5]

Profil lopatky je orientován tak, aby byla jeho spodní strana orientována proti proudu vzduchu. Tato orientace je opačná, než u vrtule letadel nebo rotoru helikoptéry. Větrný motor zpomaluje proud vzduchu, tím odebírá energii větru. Oproti tomu vrtule leteckého motoru plní funkci kompresoru, tím že proud vzduchu urychluje a zvětšuje tak jeho energii. [2]

Při pracovním chodu vrtule obtéká profil proud tak, že na horní straně profilu vzrůstá rychlost proudění a tím vzniká podtlak. Na spodní straně profilu rychlost

klesá a vzniká přetlak. Síla, kterou vyvolá podtlak je zhruba dvojnásobná než síla vyvolaná přetlakem na spodní straně profilu. [2]

Na profil působí výsledná síla F , která se skládá ze složky vztlakové F_y kolmé na proud vzduchu a složky odporové F_x působící ve směru proudu (Obr. 2.7). Mezi nejvýznamnější parametry profilu patří úhel náběhu α , který zásadně ovlivňuje velikosti sil F_x a F_y . [2]



Obr. 2.7 Silové poměry na aerodynamickém profilu [1]

Vztahy pro výpočet vztlakové a odporové síly:

$$F_x = \frac{1}{2} c_x \rho A v^2 \text{ [N] [2] (2.7),}$$

$$F_y = \frac{1}{2} c_y \rho A v^2 \text{ [N] [2] (2.8),}$$

kde c_x a c_y se jsou aerodynamické součinitele odporu a vztlaku. Tyto součinitele závisí na úhlu náběhu α . Celková síla působící na rotor se potom stanoví z rovnice:

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \text{ [N] [2] (2.9).}$$

2.5 Regulace větrných motorů

Regulace má značný význam vzhledem k proměnlivé rychlosti proudění vzduchu. Jejím úkolem je také chránit věž před značným zatížením vlivem nadměrně silného větru. V takovém případě musí regulační systém větrnou elektrárnu zcela odstavit z provozu.

Existují dvě základní skupiny regulačních systémů v závislosti na rychlosti větru:

- **Regulace pasivní (Stali)** – tento méně využívaný systém má pevně uložené listy nebo lopatky k rotoru větrné elektrárny. Používají se například u rotorů s velkým počtem lopatek. [2]
- **Regulace aktivní (Pitch)** – tento efektivní systém má v praxi největší využití zejména u středních a velkých elektráren. Regulace probíhá natáčením jednotlivých listů na rotoru. Díky tomu je zajištěn chod i při velkém rozsahu rychlostí větru, aniž by se výrazněji měnila účinnost motoru. [2]

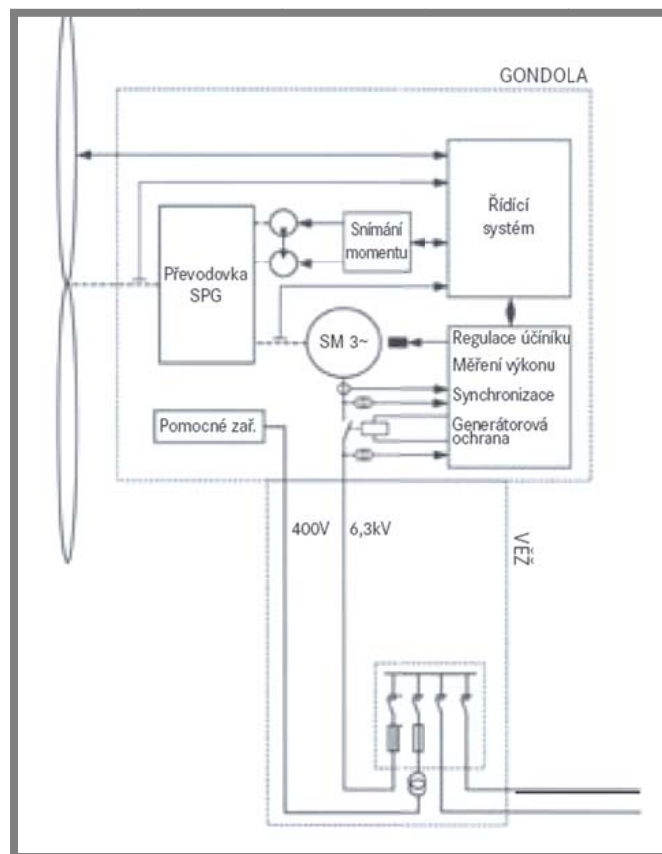
Aktivní regulaci lze provádět dvěma způsoby:

- Při zastavení rotoru jsou listy nastaveny „do praporu“. To znamená, že jsou náběžnou hranou nastaveny proti směru větru, aby větru kladly minimální odpor. Tím vzniká minimální namáhání celé konstrukce. Ovšem nevýhoda je taková, že listy se pohybují v rozsahu okolo 120°, což klade vyšší nároky na mechanismus. [2]
- U druhého způsobu regulace se listy při zastavení rotoru orientují celou svou plochou proti směru větru, tím vzniká poměrně značné zatížení věže. Dále tento způsob odstraňuje nevýhodu velkého potřebného rozsahu natáčení listů. [2]

Systém natáčení rotoru do směru větru:

- **ocasní plocha** - využití u malých elektráren, které se vyznačuje jednoduchým mechanickým řešením,
- **boční pomocné rotory** - malé a střední elektrárny,
- **natáčení pomocnými motory** - střední a velké elektrárny. [5]

V současnosti se ve velkých větrných elektrárnách používá automatické regulace. Například systém IPC (Individual Pitch Control), který zajišťuje natáčení jednotlivých listů rotoru viz. schéma na Obr. 2.8, kde je v kombinaci s převodovkou s integrovaným systémem proměnlivého převodového poměru (SPG). [5]

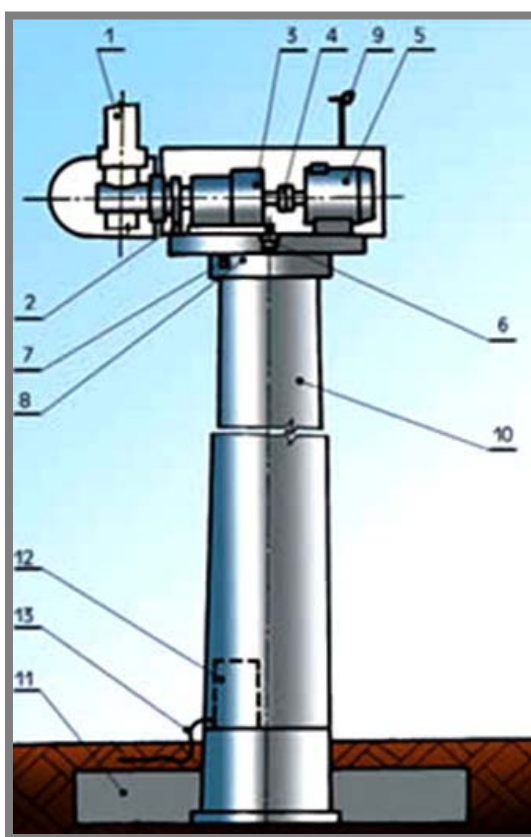


Obr. 2.8 Schéma automatické regulace větrné elektrárny [5]

3 PRVKY VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY

3.1 Základní prvky elektrárny

Konstrukční řešení středních a velkých větrných elektráren jsou si velmi podobná a skládají se z níže uvedených částí. Rozdíl je často jen ve velikosti a dimenzování mechanických částí a pak v provedení gondoly a samotné věže. Velké elektrárny mají dutý tubus věže se schody či výtahem a velkou strojovnu (Obr. 3.1).



Obr. 3.1 Schéma větrné elektrárny [9]

Popis: 1 - rotor (main shaft) s rotorovou hlavicí (hub) a listy (blades), 2 - brzda rotoru (brake), 3 - planetová převodovka (Gear-Box Transmission), 4 - spojka (cluth), 5 - generátor (Generator), 6 - servo-pohon natáčení strojovny, 7 - brzda točny strojovny (Housing), 8 - ložisko točny strojovny, 9 - čidla rychlosti a směru větru, 10 - několikadílná věž elektrárny (Tower), 11 - betonový armovaný základ elektrárny, 12 - elektrorozvaděče silnoproudého a řídicího obvodu, 13 - elektrická přípojka. [9]

3.2 Konstrukce věže

Věž větrné elektrárny je vystavována vysokým zatížením. Gondola často váží několik stovek tun. Další zatížení vzniká od rotorových listů a silou větru. Věž představuje řádově 15 – 20 procent z celkové ceny elektrárny. Vysoké věže sice znamenají velkou ekonomickou zátěž, ovšem jejich výška zásadně ovlivňuje množství vyprodukované energie. Je tedy patrné, že výška věže elektrárny je jeden z nejdůležitějších parametrů. U věží nad 80 metrů vede tubusem výtah pro snadnější přístup. [6]

Typy věží větrných elektráren:

- **Ocelové věže** – obvykle se skládají ze dvou až čtyř válcových segmentů. [6]
- **Betonové věže** – mají velkou přednost v tom, že jsou stavěny až na staveništi, tím odpadají přepravní problémy. [6]
- **Betonové věže (Pre-cast)**- betonové segmenty se umísťují postupně na sebe. Jsou zpevněny ocelovými lany ve stěnách. [6]
- **Příhradové věže** (Obr. 3.2) – tyto konstrukce se využívaly zejména v minulosti, například v USA. Ale využití nalézají i u chat a domků mimo elektrickou rozvodnou síť. [6]



Obr. 3.2 Příhradové konstrukce věží v Costa Rice [6]

- **Zakotvené věže** – použití jen u malých elektráren. [6]

3.2.1 Základy věží

3.2.1

Základy upevňují věž v zemi a zajišťují stabilitu. Hluboké pilotové nebo jen mělké základy jsou závislé především na podloží místa.

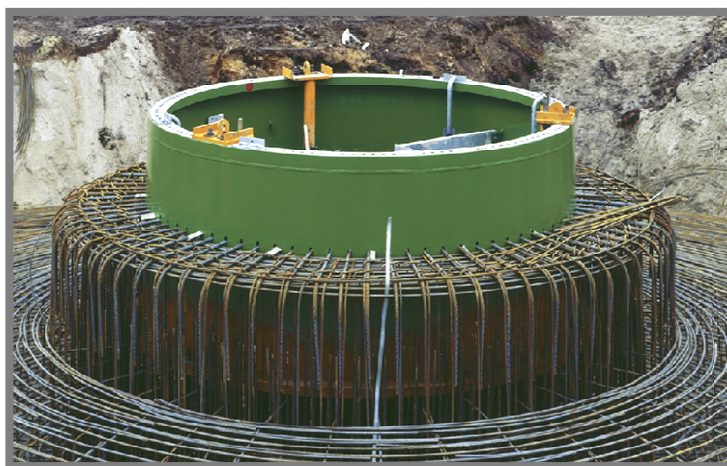
- **Plošné základy** (Obr. 3.3) – jedná se o velkou vybetonovanou plochu, která tvoří věži pevnou oporu. [6]
- **Pilotové základy** (Obr. 3.4) – základové betonové desky jsou upevněny ocelovými piloty do země. Toto řešení je nezbytné při umístění věže na měkké podloží. [6]

Typy základů pro větrné pobřežní elektrárny:

- **Tíhové základy** – jsou umístěny na mořském dnu. Tyto obrovské betonové bloky tvoří stabilní základ, který není nutné nijak dále jistit k mořskému dnu. [6]
- **Třínohý stojan** (tzv. Tripod) – konstrukce věže je ze spodní strany připevněna k rámu, který přenáší zatížení věže do tří pilotů. Každá z těchto pilot je zaražena zhruba 10 – 20 metrů do mořského dna. [6]
- **Jedna pilota** – jedná se o jeden kůl nejčastěji o průměru 4 metry zapuštěný do mořského dna. Hloubka zapuštění je různá podle geologického složení dna. Nejčastěji se pohybuje v rozmezí 10 – 20 metrů. [6]
- **Základy upevněné vlivem sníženého tlaku** (známější pod anglickým označením Bucket foundation) – Tento typ se skládá z ocelového válce s otevřenou spodní částí, podle kterého získal jméno. Z válce orientovaného otevřeným dnem k mořskému dnu je vypumpován vzduch. Vzniklý podtlak přitlačuje konstrukci ke dnu. Materiál ze dna se vlivem podtlaku dostává do vnitřku válce a ještě více upevňuje celou konstrukci věže. [6]



Obr. 3.3 Práce na plošných betonových základech [6]



Obr. 3.4 Pilotové základy větrné elektrárny ENERCON typ E-70 [6]

3.2.2 Pobřežní věže

3.2.2

Často známé pod označením **OFFSHORE**. Pobřežní podmínky kladou na věže větrných elektráren často extrémní požadavky. Je proto důležitá volba vhodného materiálu základního i přídatného. Běžně se jako základní materiál volí oceli s mezí kluzu okolo 355 MPa. Vítr na moři zaručuje vyšší účinnost větrných elektráren. Proto se instalují turbíny s výkonem 5 MW a výškami věží 100 metrů (Obr. 3.5). Pro další zvýšení výkonu se sdružují do skupin. Celkový výkon takových parků se pak plánovaně může přiblížit až k 1500 MW. [7]



Obr. 3.5 Větrný park sedmi pobřežních elektráren v Irsku, celkový výkon je 25,2MW [6]

Požadavky na věže pobřežních větrných elektráren:

Před vlastní instalací věže je nutné prostudovat všechna možná rizika, která vyplývají z charakteru prostředí, ve kterém budou pracovat. [8]

Rizika, které na pobřeží hrozí:

- kolize s lodí,
- vliv přílivu a odlivu, mořské proudy,
- plovoucí led (Severní moře),
- prudké poryvy větru, nebo hurikány. [8]

U pobřežních věží je nejčastější upevnění polohy realizováno piloty, které jsou zaraženy do mořského dna. Tento způsob lze použít do hloubky dna asi 25 m, pokud to dovolí geologické složení mořského dna. [8]

3.2.3 Svařování ocelových věží pobřežních větrných elektráren pod tavidlem

3.2.3

Únavové namáhání konstrukce věže vyžaduje, aby byly svarové spoje situovány do nízkonapěťových oblastí a bez vrubů. Průměry pilotů se pohybují okolo 4 m, délky se pohybují kolem 30 m. Piloty jsou vyrobeny z plechů tloušťek 40–70 mm a šířce 2-3 m. Větší tloušťka stěn podporuje lepší přenos tepla během procesu svařování, je proto důležité předcházet zkřehnutí a praskání za studena v tepelně ovlivněné oblasti. Tento problém lze úspěšně odstranit předehřevem základního materiálu.[8]

Konstrukční části jsou rozděleny do několika skupin podle druhu a velikosti namáhání:

- speciální konstrukční prvky (vysoce namáhané, např.: příruby),
- primární konstrukční prvky (normálně namáhané, např.: stěny věží),
- sekundární konstrukční prvky (málo namáhané, např.: držáky, úchyty),

pro pozemní konstrukce věží se běžně používá ocel S355J2G3. Ovšem podmínky na moři vyžadují vyšší hodnoty vrubové houževnatosti, proto se využívají oceli jemnozrné. Materiály speciálních konstrukčních prvků vynikají vysokou jakostí, nízkým obsahem síry, vodíku a mají zaručenou tažnost. U materiálu se požaduje mez kluzu 275 MPa a vyšší, dále velký rozsah pracovních teplot. [8]

Příklady vhodných ocelí zvolených z norem EN 10 225 [8]:

- S355G8
- S420G2
- S460G2

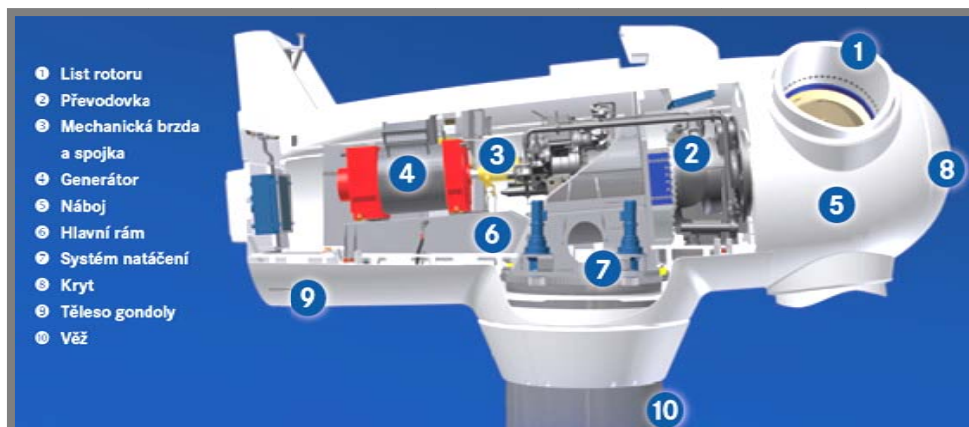


Obr. 3.6 Twin-tandemové svařování válcových částí věží větrných elektráren [8]

Jako materiály primárních konstrukčních prvků se volí podobné oceli. Evropské normy udávají obsah uhlíku pod 0,14 % a uhlíkový ekvivalent C_{CE} menší než 0,43 %. Dále je požadována hodnota nárazové práce pro V-vrub 50 J a vyšší při $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, 34 J a vyšší v podélném směru, 24 J a vyšší v příčném směru. Pokud je tloušťka materiálu větší než 40 mm je výrobce oceli povinen poskytnout zákazníkovi informace o její svařitelnosti. [8]

Požadavky na tvorbu kvalitních svarů s požadovanými mechanickými vlastnostmi stojí proti malé produktivitě. Produktivitu zvyšuje svařování více svařovacími dráty, které je důležité i z hlediska toho, že s postupem času narůstala tloušťka svařovaných materiálů a objem svarů. Příkladem produktivního svařovacího procesu je twin-tandemové svařování (Obr. 3.6), které dokáže přenést až 30 kg přídavného materiálu za hodinu do místa svaru při zatížení na 100 %. [8]

3.3 Konstrukce a základní schéma tělesa gondoly



Obr. 3.7 Schéma gondoly větrné elektrárny W2000 české společnosti Wikov Wind [15]

Vybrané parametry větrné elektrárny W2000 společnosti Wikov Wind:

Tab. 3.1 Hlavní součásti, těleso gondoly a věž [15]

Typ konstrukce	uzavřená
Materiál	polyesterová pryskyřice/ skelné vlákno
Typ náboje	tuhý
Materiál náboje	litina EN-GJS-400-18U-LT
Materiál hlavního rámu	litina EN-GJS-400-18U-LT
Konstrukce	kuželovitý tubus z oceli
Standardní výška věže	78 m
Protikorozi ochrana	ochranný nátěr

Tab. 3.2 Směrovací systém [15]

Typ směrového nastavení	aktivní
Typ ložiska směrování	kluzné
Pohonná jednotka	servomotor
Počet jednotek	4
Brzda	třením v kluzném ložisku plus motorová brzda

Tab. 3.3 Pohon natáčení listů rotoru [15]

Maximální rychlost natáčení	9°/s
Typ ložiska uložení listu	dvouřadé kuličkové ložisko
Dodavatel pohonu natáčení	Sumitomo Cyclo Europe WINDTEC

Tab. 3.4 Pohon [15]

Jmenovitý moment	1400 kNm
Maximální statický moment	5000 kNm
Typ převodu	planetový/čelní převod
Převodový poměr	1:125 – 1:79
Mazání převodovky	nucený oběh
Engineering převodovky	ORBITAL 2
Výrobce převodovky	Wikov MGI
Spojení převodovka/generátor	elastická spojka
Řízení momentu	elektro-hydraulický princip
Výrobce	WINDTEC/Bosch Rexroth

Tab. 3.5 Rotor [15]

Počet listů rotoru	3
Osa rotoru	horizontální
Poloha vůči věži	proti větru
Průměr rotoru	80 m
Plocha rotoru	5026 m ²
Rozsah otáček	12 – 19 ot. /min
Jmenovité otáčky	17,4 ot. /min
Směr otáčení (pohled po větru)	vpravo
Způsob regulace výkonu	natáčením listů
Sklon osy rotoru	4,5°

Tab. 3.6 Brzdový systém [15]

Provozní brzda	Individuální natáčení listů
Aktivace	Aktivní při provozu
Typ	Ozubení/servomotor
Mechanická brzda	Kotoučová
Aktivace	Při odstavení
Dodavatel	Svendborg Brakes

3.4 Konstrukce rotoru

Rotor je srdce každé větrné turbíny. Skládá se nejčastěji ze tří listů upevněných do náboje a krytu náboje. Funkcí rotoru je přeměna energie větru na rotaci. Funkce a výpočet byl řešen již v předchozích kapitolách. Průměry dnešních rotorů se obvykle pohybují od 40 do 90 metrů.



Obr. 3.8 Rotor moderní větrné elektrárny ENERCON E-82 na veletrhu v Hannoveru [6]

3.4.1 Rotorové listy

Základní stavební jednotkou rotoru jsou listy. Tvar a princip listů byl probrán v předchozích kapitolách. Každý ze světových výrobců si drží svůj vlastní výrobní postup a parametry listů. Listy musí být schopné odolávat velmi velkým mechanickým zatížením.

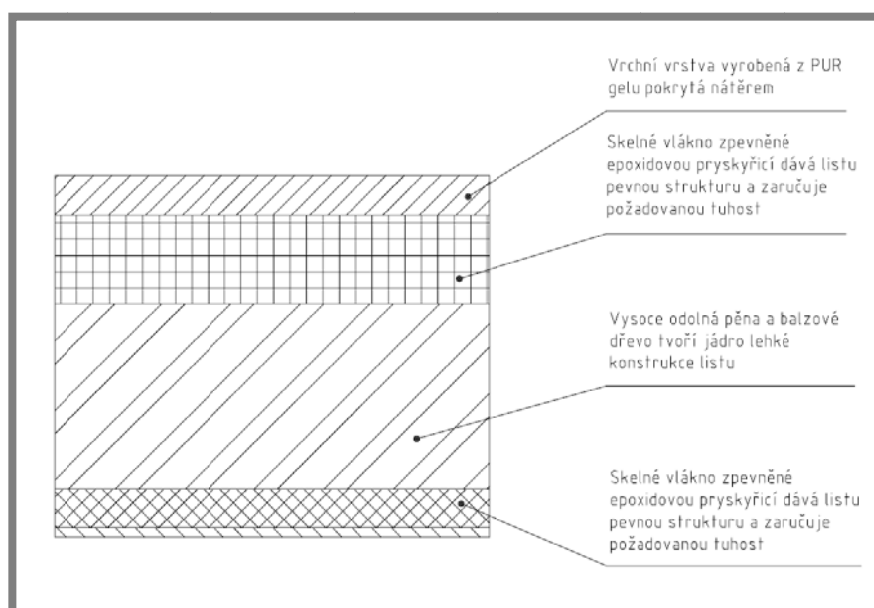
Rotorové listy se mohou skládat ze syntetických materiálů na bázi plastů zesílených skleněnými a karbonovými vlákny. Jednotlivé vrstvy jsou obvykle spojeny k sobě použitím epoxidové pryskyřice. Hliníkové a ocelové slitiny se vyznačují vyšší hmotností a schopností lépe odolávat únavovému poškození. Proto jsou tyto materiály využívány zejména u rozměrově menších rotorů. [12]

Moderní koncept firmy Enercon se soustředí na efektivnější získávání elektrické energie, nízké zvukové emise a zmenšení napjatosti na lopatce. Protože jejich inovativní design je méně citlivý na turbulence a dokáže zajistit rovné hladké proudění podél aerodynamického profilu listu. [12]

Jedním z hlavních parametrů zlepšující tyto vlastnosti je zahnutí konce každého z listů rotoru (Obr. 3.9), tím dochází zejména ke snížení zvukových emisí. Dále s úspěchem dochází k odstranění turbulencí vyskytujících se na koncích listů vlivem přetlaků a podtlaků. Proto dochází k využití celé délky listu bez podstatných ztrát energie. [12]



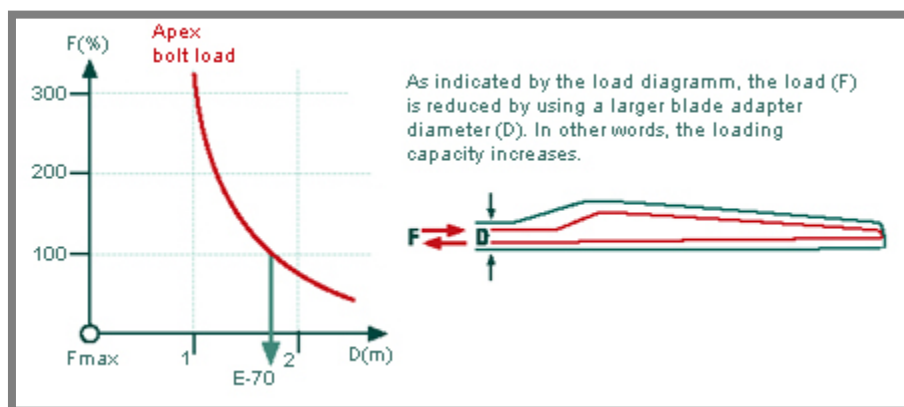
Obr. 3.9 Zahnutí konce listu od firmy Enercon [12]



Obr. 3.10 Struktura rotorového listu o větrné elektrárny Enercon E-70 [12]

Větrné listy jsou vyráběny ve vakuu tzv. sendvičovou metodou (Obr. 3.10). Desky skleněného vlákna jsou umístěny ve formě ve vakuu. Jsou impregnovány čerpadlem a systémem hadic. Tato metoda odstraňuje možnost výskytu vzduchových kapes ve vrstvených materiálech, které by znamenaly výsledné negativní vlastnosti listů. [12]

Dalším významným parametrem, který napoháhá ke snížení napjatosti je to, že listy rotoru mají extrémně velký průměr příruby (Obr. 3.8). Spojení s nábojem je realizováno dvěma řadami šroubů. Tento způsob se využívá zejména v oblastech se silnými větrnými prouděními. Grafické vyjádření lze charakterizovat zátěžovým diagramem (Obr. 3.11). Z grafu vyplývá, že použitím většího průměru příruby roste velikost maximálního možného zatížení. [12]



Obr. 3.11 Zátěžový diagram listu větrné elektrárny, jedná se o závislost mezi silovým účinkem a průměrem příruby [12]

3.4.2 Náboj

3.4.2

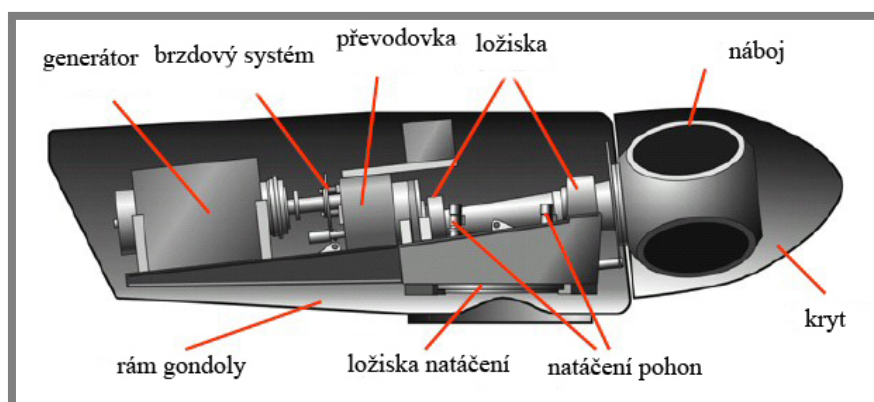
Náboj tvoří střed rotoru, ke kterému jsou připevněny vrtulové listy. Mezi používané materiály patří litiny nebo oceli. Náboj rotoru přesouvá energii, kterou zachycují listy, do navazujících částí gondoly až ke generátoru. Pokud se jedná o elektrárny s převodovkou, je náboj rotoru připojený k pomaloběžné hřídeli převodovky. Pokud se jedná o elektrárnu bez převodovky, hovoří se o přímém pohonu, kdy je energie vyráběna přímo v kruhovém generátoru (Obr. 3.8).

3.5 Hnací ústrojí (Obr. 3.12)

3.5

Hnací ústrojí se skládá z těchto základních částí:

- rotorová hřídel s uložením,
- převodovka (turbíny s přímým pohonem ji nemají),
- brzdový systém a spojku,
- generátor.[6]

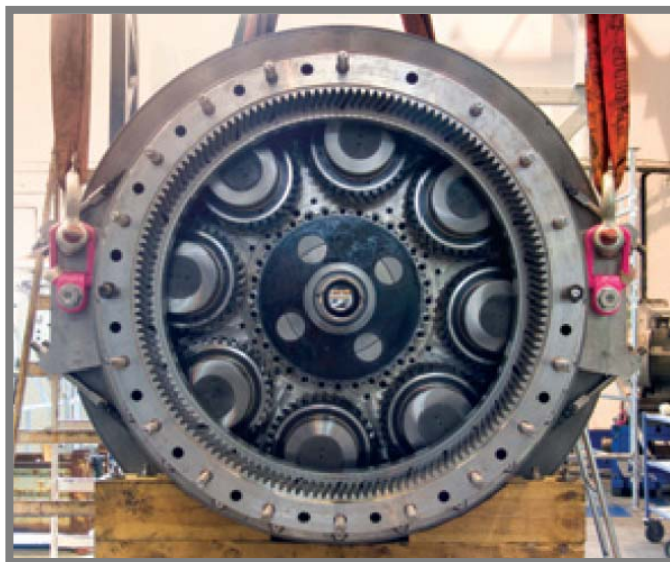


Obr. 3.12 Hnací ústrojí s převodovkou [6]

V zásadě existují dva základní typy hnacího ústrojí. Jejich rozdíl spočívá v tom, jestli má daná elektrárna převodovku (Obr. 3.13) nebo nikoli, potom se jedná o přímý pohon. Funkce převodovky je taková, že přeměňuje energii z pomalu otáčejícího se rotoru na vysoké otáčky generátoru. Otáčky rotoru se pohybují v rozmezí 18 – 50 otáček za minutu a otáčky generátoru jsou 1500 za minutu. [6]

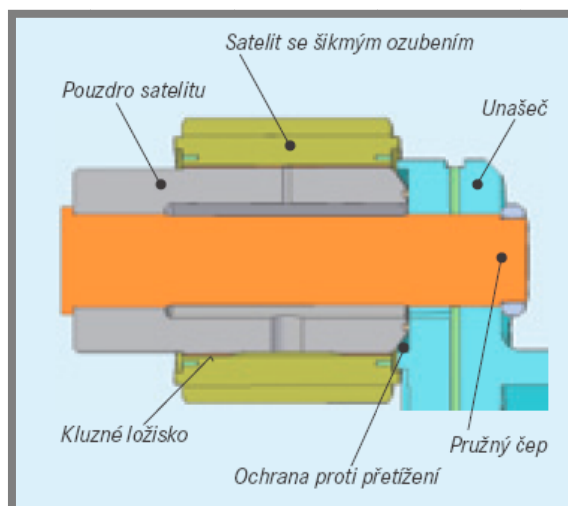
3.5.1 Převodovka s proměnným převodovým poměrem (Obr. 3.13)

Tento typ převodovky umožňuje plynulou změnu převodového poměru v celém rozsahu pracovních otáček rotoru větrné elektrárny a tím dosahuje udržení konstantních otáček synchronního generátoru. Regulace probíhá podle síly větru. Při nízkých rychlostech větru dochází ke zvětšení převodového poměru, naopak při vysokých rychlostech větru se převodový poměr zmenšuje. Převodovka a generátor jsou tak chráněny před velkým krouticím momentem. Tento typ převodovky zahrnuje pouze mechanické a hydraulické komponenty, tím se dosahuje menší cenové náročnosti oproti elektronickým zařízením.



Obr. 3.13 Planetová převodovka s osmi satelity uloženými na pružných čepích [15]

Planetové převodovky využívající principu plynulé změny převodového poměru využívají technologii uložení satelitů na pružných čepích. Princip tohoto uložení je patrný z Obr. 3.14. Kdy vlivem torzního namáhání dochází k elastickým deformacím čepů a tím se dostává ozubení satelitu do optimální polohy pro záběr s protějším ozubeným kolem. Dochází k rovnoměrnému rozložení podélného zatížení ozubení a zároveň ke stejnému zatížení jednotlivých ložisek. Díky rovnoměrnému rozložení lze docílit menší hmotnosti převodovky. [15]

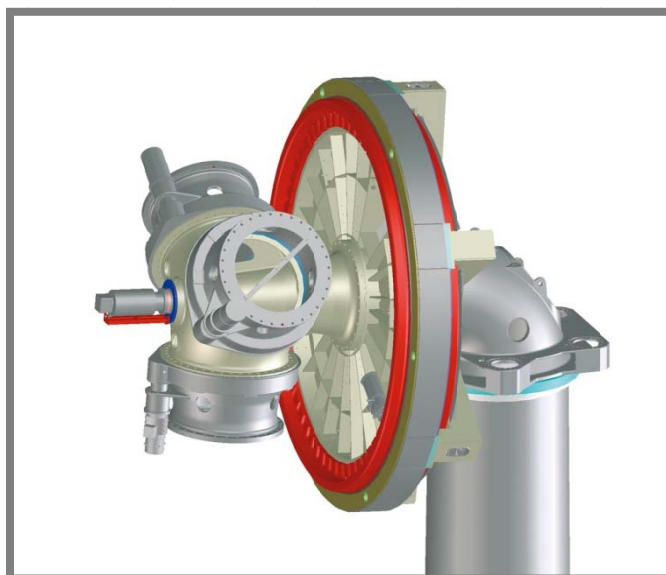


Obr. 3.14 Schéma uložení satelitů planetové převodovky na pružných čepích [15]

3.5.2 Přímý pohon (Obr. 3.15)

3.5.2

Tento typ pohonu je realizovaný bez převodovky, proto je převodový poměr konstantní i při změnách rychlosti větru. Podstata výroby těchto typů hnacích ústrojí spočívá v tom, že se redukuje počet rotujících částí. Tím dochází ke snížení mechanického namáhání a zároveň se zvyšuje životnost technického vybavení. Dalším důležitým hlediskem výroby jsou nižší náklady na provoz a údržbu pohonu. Menší počet rotujících součástí znamená podstatné snížení finanční náročnosti. [12]



Obr. 3.15 Hnací ústrojí firmy Enercon s přímým pohonem [6]

Náboj rotoru a kruhový generátor jsou k sobě navzájem připevněny a tvoří pevný celek (Obr. 3.15) bez ozubených převodů. Jednotka rotoru je umístěná na pevné nápravě, neboli na tzv. čepu nápravy. Ve srovnání s hnacím ústrojím

s převodovkou, které mají velké množství nosných bodů, má přímé hnací ústrojí od firmy Enercon jen dvě válcová ložiska. Důvodem je pomalu se otáčející se vrtule.

Mezi používané materiály pro výrobu náboje patřily v minulosti především litiny. V dnešní době se již především využívají odlitky z litiny s kuličkovým grafitem, který se vyznačuje velmi dobrými mechanickými vlastnostmi. Proto se používá pro výrobu dalších důležitých komponentů větrné elektrárny, jako např.: pouzdra pro rotorové listy, nebo čepy náprav. [12]

Další částí přímého pohonu je prstencový generátor, který poskytuje skoro hladký tok elektrické energie. Zároveň pomalý běh rotujících součástí omezuje větší opotřebování materiálů, tím má generátor větší životnost. Kruhový generátor je pomaloběžný synchronní generátor, u kterého výstupní napětí a frekvence kolísá s rychlostí větru. Tyto veličiny jsou na stejnosměrný výstup přeměňovány v invertoru. [12]

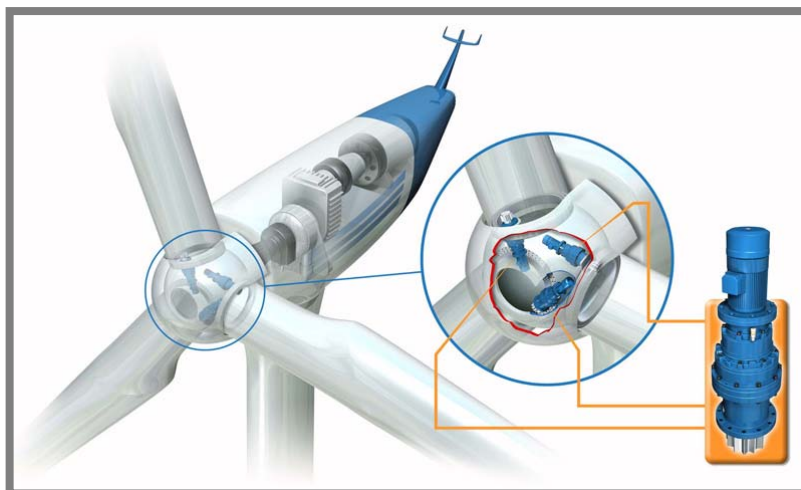
Vinutí statoru je realizováno ručně vinutými měděnými dráty v jednotlivých skupinách (Obr. 3.16). Jako izolace slouží to, že dráty jsou zality v laku. Magnetické pole je buzené pomocí pólových nástavců, které se nachází na disku rotoru. Přesné umístění a tvar pólových nástavců má zásadní vliv na vznik hluku. [12]



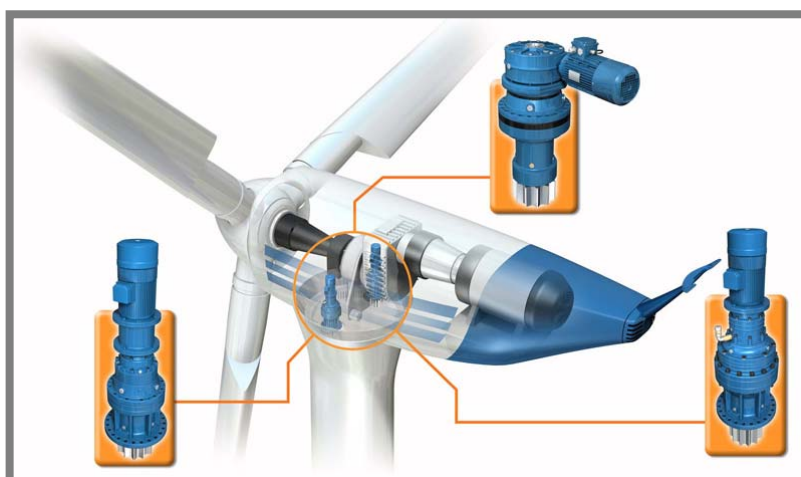
Obr. 3.16 Vinutí kruhového generátoru [6]

3.5.3 Systém natáčení věže

Pro zajištění stálého maximálního možného výkonu větrné turbíny slouží natáčecí systém. Indikátorem tohoto systému je anemometr umístěný na gondole, který snímá aktuální směr a sílu proudění větru. Tato data jsou dále zpracovávána v regulačním systému, který následně ovládá regulační prvky. Těmito prvky jsou motory v náboji (Obr. 3.17), které slouží pro natáčení rotorových listů, nebo motory, které natáčí gondolu věže přes systém několika planetových převodovek (Obr. 3.18).



Obr. 3.17 Pitch systém regulace pomocí natáčení listů rotoru. Dosahovaný krouticí moment se pohybuje od 5800 – 10000 Nm [6]



Obr. 3.18 Systém natáčení gondoly s dosahovaným krouticím momentem od 10000 – 70000 Nm [6]

3.5.4 Ložiska pro nastavení listů rotoru a otáčení celé gondoly

3.5.4

Nová ložiska z produkce firmy SKF zaručují lepší dosažení optimálního výkonu a vyšší životnost. Těchto zlepšení je dosaženo použitím centrálního mazacího systému. Ložiska odolávají vibracím za klidu (tzv. false-brinelling) díky speciálnímu plastickému mazivu. Automatický mazací systém dopravuje malá množství plastického maziva do všech mazacích míst po dobu šesti měsíců. Tím dochází k výraznému úbytku spotřebovaného maziva a úspoře provozních nákladů. Po uplynutí doby šesti měsíců je mazivo doplněno do zásobníku. [13]

Díky tomu, že je zaručena těsnost mazacího systému je zde malý vliv dopadající na životní prostředí. Ložisko je navíc opatřeno dvojvrstevným povlakem,

který zaručuje dlouhodobou ochranu proti korozi i v oblastech se zhoršenými klimatickými podmínkami, např. na moři. [13]

Nový typ ložisek snižuje hmotnost celé gondoly. Jedná se ložiska kuželíková dvouřadá (Obr. 3.19) se segmentovými klecemi. Tyto ložiska, v nichž jsou kuželíky orientovány proti sobě, se vyznačují velkou tuhostí. Velké průměry ložisek navíc znamenají, že ložiska jsou dostatečně masivní, aby byly schopné odolávat velkým krouticím a ohybovým momentům. [13]



Obr. 3.19 Nový typ ložisek pro natáčení gondoly větrné elektrárny od firmy SKF [13]

4 BUDOUCÍ VÝVOJ VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN

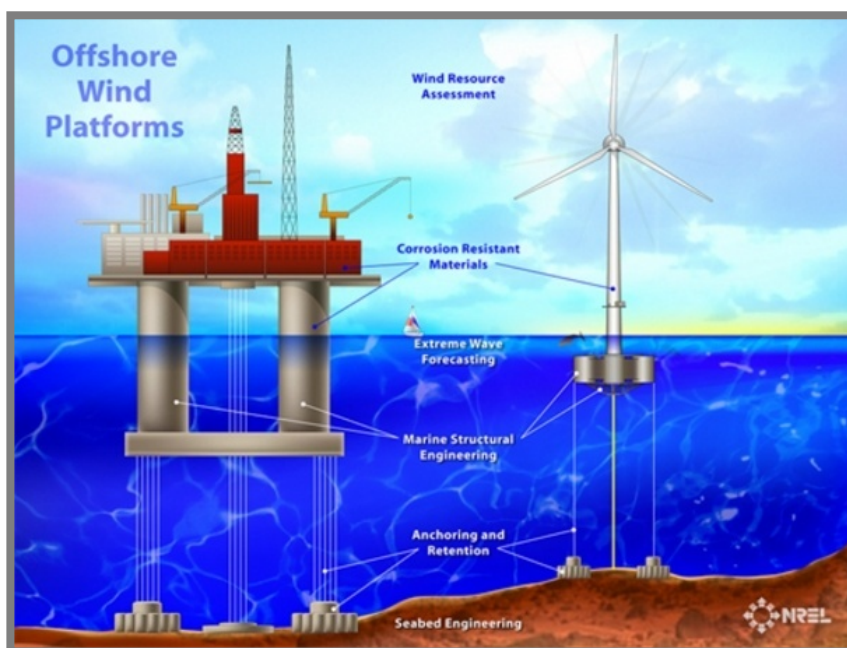
4

4.1 Plovoucí větrné elektrárny (Obr. 4.1)

4.1

Jedním z možných směrů, ke kterým bude směřovat větrná energetika je umístování věží na moři dále od pevniny. Ve světě už jsou běžné větrné parky Offshore větrných elektráren. Ale například firma Norsk Hydro přichází s novým projektem plovoucích elektráren na volném moři daleko od pevniny, kde vane daleko silnější a pravidelnější vítr než na pevnině. Dalším významným hlediskem je to, že není potřeba financovat pozemky, na kterých jsou věže umístěny. Věže se umísťují v dostatečné vzdálenosti od pobřeží i z důvodu tažných cest ptactva. [16]

Konstrukce využívá systém tří kotevních lan, pomocí kterých se upevňuje 200 metrů vysoký plovák s turbínou. Instalovaný rotor bude mít průměr 140 metrů. Jedna elektrárna dokáže produkovat výkon 5 MW. Projekt počítá, že plovoucí elektrárny budou pracovat ve vzdálenosti 50 až 1250 kilometrů od norských břehů v hloubkách okolo 200 metrů. Na místo dopraví celou elektrárnu tažná loď. Plovák je z části vyplněn betonem, zbytek bude doplněn vodou. Celý plovák bude pevně přichycen pomocí kotevních lan realizovaných řetězy, které zabrání pohybu plováku nahoru a dolů, ale dovolí náklony. Počítačové simulace dokázaly, že lisy budou bezpečně z dosahu i těch největších vln. [16]



Obr. 4.1 Srovnání konstrukce plovoucí ropné plošiny s plovoucí větrnou turbínou [14]

Plovoucí elektrárny budou produkovat dvojnásobné množství elektrické energie než offshore elektrárny. Jejich velkou výhodou přitom bude možnost převozu na jiné místo, kde bude potřeba posílit elektrickou síť. [16]

5 ZÁVĚR

Cílem této práce je poskytnout stav současného poznání v oblasti konstrukcí vysokých větrných elektráren. Úvodní část práce je věnována historii využívání energie větru a definici základních pojmů, které jsou nezbytné pro konstrukci větrné elektrárny. V této části je dále zahrnut základní výpočet, který slouží k výpočtu výkonu, který je schopná elektrárna na daném místě produkovat. Ve druhé části jsem se zaměřil na rozdělení větrných motorů, se kterými se lze setkat na poli větrné energetiky. Dále je zde popsán aerodynamický profil se základním výpočtem a základní možnosti regulace větrných turbín. Podstatná část práce je věnována nejdůležitějším konstrukčním prvkům věže elektrárny, např. moderní výroba profilu listu vrtule, nebo propracovaný systém mazání ložisek, který zvyšuje jejich životnost. V poslední části jsem se snažil rozvést směr, kterým by se podle mého názoru mohla větrná energetika ubírat.

Z počátku práce byl můj názor na stavbu větrných elektráren poměrně skeptický. Můj negativní postoj vůči větrným elektrárnám spočíval v jejich nedostatečném výkonu a v neposlední řadě také hledisko dopadu na ráz krajiny. Tyto nepodložené argumenty mě upevňovaly v tom, že větrné elektrárny nemohou dnešní moderní společnosti významným způsobem pomoci při výrobě značného množství elektrické energie. Postupným studiem různých dostupných materiálů a psaním této bakalářské práce se začalo moje stanovisko obracet. Nejvíce mi v tomto směru pomohl již zmiňovaný projekt firmy Norsk hydro, který uvádí na pole větrné energetiky plovoucí větrné elektrárny. Tyto elektrárny podle mého názoru splňují požadavky moderní společnosti na produkování tzv. čisté energie z alternativních zdrojů. Díky tomu, že budou pracovat daleko od mořských břehů, tak nebudou výrazně narušovat ráz krajiny. Dalším aspektem bude bezesporu jejich výkon, protože vytvořením větrných parků z tohoto typu elektráren vznikne poměrně významný zdroj energie, který je navíc mobilní a lze ho přesunout na místo, kde bude potřeba posílit přetíženou elektrickou síť.

I přes celou řadu nevýhod, které s sebou přináší stavba vysokých větrných elektráren musím říct, že tento způsob výroby energie je stejně důležitý jako ostatní alternativní způsoby. Ukazuje cestu, která znamená menší dopady na životní prostředí, než jak tomu je u klasických zdrojů elektrické energie, jako jsou např. tepelné a jaderné elektrárny. Avšak díky ne tak dobrým větrným podmínkám, které např. panují u přímořských států, a velké hustotě osídlení, budou větrné elektrárny na území České republiky i nadále sloužit zejména jako doplňkový zdroj energie.

6 POUŽITÉ ZDROJE

Literatura:

- [1] CROME, H. *Technika využití energie větru*. 1. vydání. Nakladatelství HEL Ostrava, 2002. 144 stran. ISBN 80-86167-19-4.
- [2] RYCHETNÍK, V., PAVELKA, J., JANOUŠEK J. *Větrné motory a elektrárny*. 1.vydání. Vydavatelství ČVUT Praha, 1997. 199 stran. ISBN 80-01-01563-7
- [3] HORÁK, K. *Návrh řešení malého alternativního zdroje elektrické energie*. Brno, VUT-FSI., 2007, 48 s.

World Wide Web:

- [4] *Alternativní zdroje energie* [online]. [cit. 2008-4-19]. URL: <<http://www.alternativni-zdroje.cz/vetrne-elektrarny.htm>>.
- [5] *Automatizace.hw.cz* [online]. c1997, [cit. 2008-4-19]. URL: <<http://automatizace.hw.cz/vetrne-elektrarny-mikro-male-i-velke-princip-provedeni-regulace>>.
- [6] *Wind energy – Technology and planning* [online]. c2006, [cit. 2008-4-19]. URL: <<http://www.world-wind-energy.info/>>.
- [7] *All for power* [online]. c2007, [cit. 2008-4-19]. URL: <<http://www.allforpower.cz/clanek/16-svarovani-ocelovych-vezi-pobreznich-vetrnych-elektraren-pod-tavidlem-submerged-arc-welding-of-steel-on-shore-wind-power-plants/>>.
- [8] *Konstrukce* [online]. c2002, [cit. 2008-4-19]. URL: <<http://www.konstrukce.cz/clanek/662-svarovani-ocelovych-vezi-pobreznich-vetrnych-elektraren-pod-tavidlem/>>.
- [9] STACH, Jan. *Digi World* [online]. c2006, [cit. 2008-4-19]. URL: <<http://www.ddworld.cz/clanky/clanek-typy-elektraren-kde-se-bere-elektrina-17.html>>.
- [10] HLOBÍLEK, Robert. *Fotoblog* [online]. c2005, [cit. 2008-4-19]. URL: <<http://foto.2705.net/fotogalerie/rymice---vetrny-mlyn/76.html>>.
- [11] *WinWinD* [online]. [cit. 2008-4-19]. URL: <<http://www.winwind.fi/english/tuotteet-1mw-yleistiedot.html>>.
- [12] *ENERCON* [online]. c2004, [cit. 2008-4-19]. URL: <http://www.enercon.de/en/_home.htm>

- [13] *MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2008-4-19].
URL: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nova-loziska-a-mazaci-system-pro-vetrne-elektrany>>.
- [14] *Český rozhlas* [online]. c2000, [cit. 2008-4-19].
URL: <http://www.rozhlas.cz/leonardo/technologie/_zprava/290903>.
- [15] *Wikov Wind* [online]. [cit. 2008-4-19].
URL: <http://www.wikov.com/wind/pdf/w2000spg_cz.pdf>.

Časopisy:

- [16] *Alternativní energie* . Č.6 (prosinec 2007). Praha: CEMC, 2007.
Vychází dvouměsíčně.

7 POUŽITÉ ZKRATKY, SYMBOLY A VELIČINY

7

kW	- kilowatt (10^3 W)
MW	- megawatt (10^6 W)
GWh	- gigawatthodina
Nm	- newtonmetr
Mpa	- megapascal (10^6 Pa)
v_1 [m/s]	- rychlost vzduchu před vrtulí
v_2 [m/s]	- rychlost vzduchu za vrtulí
A_1 [m ²]	- velikost plochy před vrtulí
A_2 [m ²]	- velikost plochy za vrtulí
λ [-]	- součinitel rychloběžnosti
v^* [m/s]	- je průměrná rychlost větru ve výšce h nad zemským povrchem
v_0^* [m/s]	- je průměrná rychlost větru v referenční výšce h_0
h [m]	- je výška, ve které je rychlost proudění vzduchu počítána
h_0 [m]	- je referenční výška, ve které je rychlost proudění vzduchu známá
n [-]	- je korekční exponent, který závisí na drsnosti a profilu povrchu
E [J]	- energie hmoty vzduchu
v [m/s]	- rychlost větru
m [kg]	- hmotnost vzduchu
ρ [kg/m ³]	- hustota vzduchu
V [m ³]	- objem vzduchu
A [m ²]	- plocha vrtule
s [m]	- dráha, kterou urazí vzduch v pohybu
P_v [W/m ²]	- výkon vrtule vztažený na jednotkovou plochu
t [s]	- čas
E_v [J/m ²]	- energie větru za daný časový úsek jednotkovou plochou při teplotě a hustotě vzduchu
F_a [N]	- axiální síla na rotor
C_p [-]	- výkonový součinitel
n_j [min ⁻¹]	- jmenovité otáčky rotoru
D [m]	- průměr vrtule rotoru
F_x [N]	- odporová síla
F_y [N]	- vztlaková síla
F [N]	- celková síla působící na rotor
c_x [-]	- aerodynamický součinitel odporu
c_y [-]	- aerodynamický součinitel vztlaku
α [°]	- úhel náběhu

8 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1 Větrný mlýn v Rymicích na kroměřížsku z roku 1795	13
Obr. 1.1 Schéma hlavních směrů větru na zeměkouli	14
Obr. 1.2 Schéma proudění vzduchu mezi tlakovou výší (V) a níží (N) na severní polokouli	14
Obr. 1.3 Větrná mapa České republiky	16
Obr. 1.4 Urychlení větru na horském hřebenu	17
Obr. 1.5 Závislost výkonu větru P_v protékajícího jednotkovou plochou 1 m^2 na jeho rychlosti v	18
Obr. 1.6 Výkonové křivky větrné elektrárny WWD-1	19
Obr. 2.1 Rotor typu Darrieus se zakřivenými lopatkami do tvaru Φ	20
Obr. 2.2 Darrielův rotor v kombinaci se Savoniovým rotorem	21
Obr. 2.3 Urychlení proudu vzduchu pomocí konfuzoru	22
Obr. 2.4 Možnost zvýšení výkonu vrtule s použitím difuzoru	22
Obr. 2.5 Schéma proudu vzduchu procházejícího vrtulí	23
Obr. 2.6 Zobrazení aerodynamického profilu v proudu vzduchu	24
Obr. 2.7 Silové poměry na aerodynamickém profilu	25
Obr. 2.8 Schéma automatické regulace větrné elektrárny	27
Obr. 3.1 Schéma větrné elektrárny	28
Obr. 3.2 Příhradové konstrukce věží v Costa Rice	29
Obr. 3.3 Práce na plošných betonových základech	30
Obr. 3.4 Pilotové základy větrné elektrárny ENERCON typ E-70	30
Obr. 3.5 Větrný park sedmi pobřežních elektráren v Irsku, celkový výkon je 25,2 MW	31
Obr. 3.6 Twin-tandemové svařování válcových částí věží větrných elektráren	32
Obr. 3.7 Schéma gondoly větrné elektrárny W2000 české společnosti Wikov Wind	33
Obr. 3.8 Rotor moderní větrné elektrárny ENERCON E-82 na veletrhu v Hannoveru	35
Obr. 3.9 Zahnutí konce listu od firmy Enercon	36
Obr. 3.10 Struktura rotorového listu o větrné elektrárny Enercon E-70	36
Obr. 3.11 Zátěžový diagram listu větrné elektrárny, jedná se o závislost mezi silovým účinkem a průměrem příruby	37
Obr. 3.12 Hnací ústrojí s převodovkou	37
Obr. 3.13 Planetová převodovka s osmi satelity uloženými na pružných čepech	38
Obr. 3.14 Schéma uložení satelitů planetové převodovky na pružných čepech	39
Obr. 3.15 Hnací ústrojí firmy Enercon s přímým pohonem	39
Obr. 3.16 Vinutí kruhového generátoru	40
Obr. 3.17 Pitch systém regulace pomocí natáčení listů rotoru. Dosahovaný krouticí moment se pohybuje od 5800 – 10000 Nm	41
Obr. 3.18 Systém natáčení gondoly s dosahovaným krouticím momentem od 10000 – 70000 Nm	41

Obr. 3.19 Nový typ ložisek pro natáčení gondoly větrné elektrárny od firmy SKF	42
Obr. 4.1 Srovnání konstrukce plovoucí ropné plošiny s plovoucí větrnou turbínou	43

9 SEZNAM TABULEK

Tab. 1.1 Závislost exponentu n na druhu povrchu	16
Tab. 2.1 Dosahované hodnoty výkonového součinitele C_p a rychloběžnosti u vybraných typů větrných motorů	24
Tab. 3.1 Hlavní součásti, těleso gondoly a věž	33
Tab. 3.2 Směrovací systém	33
Tab. 3.3 Pohon natáčení listů rotoru	33
Tab. 3.4 Pohon	34
Tab. 3.5 Rotor	34
Tab. 3.6 Brzdový systém	34